

УДК 621.31

В. Н. Павлыш, Г. В. Доценко, С. А. Григорьев, К. В. Коновалов
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк
283001, г. Донецк, ул. Артема, 58

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО КАНАЛА НЕПРЕРЫВНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭНЕРГИИ МОБИЛЬНОМУ ПОТРЕБИТЕЛЮ

V. N. Pavlysh, G. V. Dotsenko, S. A. Grigoriev, K. V. Konovalov
Donetsk National Technical University, Donetsk
283001, Donetsk, Artem str., 58

PARAMETRIC OPTIMIZATION OF A HIGH-FREQUENCY CHANNEL OF CONTINUOUS ENERGY TRANSFORMATION TO A MOBILE CONSUMER

Подтверждена доказательная база результатов экспериментов С. В. Авраменко и Д. С. Стебкова относительно возможности передачи энергии на расстояние по одному проводу, что дает огромные экономические и технические преимущества. При энергопередаче обычным способом 10-15% энергии теряется на нагрев проводов (джоулево тепло). Но, при однопроводной передаче энергии, преобразованной в высокочастотную реактивную форму, достаточно применять тонкий провод диаметром - по соображениям его прочности, т.к. он не нагревается и джоулевы потери уменьшаются почти в сто раз. Что сокращает расход металла на провода, которые могут быть сделаны из любого проводника-шнура, т.к. их электропроводимость значения уже не имеет и их задача – дать направление тока или держать непрерывный контакт с мобильным роботом, получающим одновременно энергопитание по этой однопроводной линии. Представленные исследования показали возможность и определили инструменты, позволяющие оптимизировать и сохранять эффективный режим энергоснабжения мобильного робота при его перемещениях, требующих масштабных изменений длины однопроводной линии, являющейся объектом с распределенными параметрами.

Ключевые слова: электромагнитная энергия, однопроводная передача, стоячие волны, параметрическая оптимизация.

The evidence base of the results of the experiments of S.V. Avramenko and D.S. Stebkov regarding the possibility of transmitting energy over a distance by one wire has been confirmed, which gives huge economic and technical advantages. When power is transmitted in the usual way, 10-15% of the energy is lost on heating the wires (Joule heat). But, with a single-wire transmission of energy converted into a high-frequency reactive form, it is enough to use a thin wire with a diameter - for reasons of its strength, because it does not heat up and the Joule losses are reduced by almost a hundred times. This reduces the consumption of metal for wires that can be made from any conductor-cord, because their electrical conductivity no longer matters and their task is to give the direction of the current or keep continuous contact with a mobile robot receiving power supply through this single-wire line at the same time. The presented studies have shown the possibility and identified tools that allow optimizing and maintaining an efficient mode of power supply for a mobile robot during its movements that require large-scale changes in the length of a single-wire line, which is an object with distributed parameters.

Keywords: electromagnetic energy, single-wire transmission, standing waves, parametric optimization.

Введение

Электромагнитная энергия распространяется вдоль линий электропередач ЛЭП в виде бегущих волн электромагнитного поля или поля зарядов [1]. Провода для линий, изготовленные из алюминия или меди, являются проводящими каналами (направляющими), вдоль которых движется поток электромагнитной энергии от генератора к приемнику энергии и обратно к генератору. Максимальная передаваемая мощность трехфазных ЛЭП ограничивается потерями на сопротивлении линии, максимальным напряжением, которое определяется электрической прочностью изоляции и электромагнитной устойчивостью линии. Современный подход к обеспечению электромагнитной устойчивости заключается в жестком регулировании параметров линии с помощью быстродействующих шунтовых реакторов и последовательной емкостной компенсации с целью исключения перетоков реактивной мощности и подавления резонансных свойств линии [2]. Сегодня, в связи с развитием робототехники, возникла задача непрерывного энергообеспечения мобильных (непрерывно перемещающихся) устройств, объем энергопотребления которых ежегодно растет – пропорционально росту функций, поручаемых роботам. Поэтому потребовалось найти решение для устранения зависимости мобильных устройств от времени непрерывной активной работы за счет обеспечения постоянного их электропитания по гибкой длинной электролинии переменной длины.

Актуальность работы. Непрерывное энергоснабжение постояннодвигающегося потребителя требует применения электролинии с изменяющейся длиной, а значит, она имеет распределенные параметры. В этом случае переменные параметры линии энергоснабжения, ставшей «длинной линией с распределенными параметрами» [3], [4], могут привести к срыву амплитуды и частоты передаваемого электромагнитного потока и потере необходимого уровня надежности энергообеспечения мобильного устройства. Потребовался системный анализ: за счет чего компенсировать наращивание/сокращение длины линии и как, и какие выбрать средства: переключатели шунтов или частоты генератора для стабилизации оптимальных режимов подачи питания мобильному потребителю энергии по длинной линии с переменными и распределенными параметрами. Решение такой задачи потребовало выбора и обоснования математической модели объекта исследования, коим является длинная линия, обладающая желательным малым весом, достаточной гибкостью и прочностью, легко монтируемой и допускающей высокую удельную плотность передаваемой энергии для достижения высокого КПД. Такой оказалась высокочастотная высоковольтная линия типа «Вилка Авраменко» [5-7]. В этой связи тема работы является актуальной.

Цель работы. Определить режимы наиболее эффективной передачи энергии к перемещающемуся потребителю-роботу, находящемуся в непрерывной связи с источником питания по однопроводной линии, являющейся разновидностью длинной линии с распределенными параметрами. Идентифицировать параметры линии, управление которыми обеспечивает стабилизацию требуемого режима энергообеспечения робота при изменяющейся в широких пределах длины провода. Доказать возможность поддержки оптимального режима транспорта энергии по однопроводной линии переменной длины.

Основное содержание работы. Рассмотрим модель процессов передачи потока энергии по длинной линии. Генерация электроэнергии происходит взаимодействием колебаний зарядов и электромагнитных полей. Направленная передача энергии от источников к удаленному потребителю происходит по и вдоль проводников, а к

мобильному потребителю – через электромагнитные поля и преобразователи формы энергии активная-реактивная-активная. Поле заряда и волна не есть одно и то же. Установлено, что квазистатические электрические и магнитные поля у движущегося заряда не являются электромагнитной волной. Поля зарядов имеют мгновенно действующий характер, как показано в [8], [9]. Поэтому Максвелл, записав свои уравнения, фактически открыл новый вид материи – электромагнитную волну, которая имеет свои особые свойства именно при передаче электромагнитной энергии длинной линией – ДЛ. Эти свойства существенно отличают электромагнитную волну от инерциальных материальных тел – стационарных проводов электросетей, которые широко применяются на практике и потому изучены экспериментально, т.к. хорошо описываются телеграфными уравнениями и теорией Максвелла. Главное отличие длинной линии от сосредоточенной — распределение пучностей тока и напряжения вдоль неё [10], [11]. В ДЛ такое распределение начинается при условии её длины равной $1/4$ от длины волны, а сама волна распространяется вдоль ДЛ с около световой скоростью. В сосредоточенной линии пучностей тока и напряжения не наблюдается, т.к. длина такой линии намного меньше длины волны. Так всё и было до открытия медленных волн, которые позже Д. Смит назовёт – магнитными [9].

В работе [12] теоретически показано, что уравнения Максвелла в калибровке Лоренца имеют дело не только с инерциальными заряженными частицами, но и заряженными частицами, не имеющими инерции (виртуальные заряды безинерциальных токов). Виртуальные заряды проявляются на поверхности металлов. Их движение есть токи Тесла, распространяющиеся вдоль проводников электрических цепей. В МЭИ проведены эксперименты, подтверждающие их существование, и выявляющие их некоторые особенности при передаче активной и реактивной энергии в электрической цепи [5].

Практика показала существование громадных потерь реактивной мощности в электрических цепях. Так в цепях постоянного тока значение мгновенной и средней мощности за какой-то промежуток времени совпадают и, поэтому, понятие реактивной мощности в них отсутствует. Но в цепях переменного тока так происходит только в том случае, если нагрузка чисто активная. Пример – электронагреватель или лампа накаливания. При такой нагрузке в цепи переменного тока фаза напряжения и тока совпадают, поэтому вся мощность передаётся в нагрузку, она активная.

Но, если нагрузка индуктивная (трансформаторы, электродвигатели), то ток в питающей цепи отстаёт по фазе от напряжения, а если нагрузка еще и емкостная, то ток по фазе опережает напряжение. В итоге ток и напряжение не совпадают по фазе (т.к. реактивная нагрузка) и в нагрузку (потребителю) передаётся только часть мощности (от полной мощности), которая могла бы быть передана от генератора в нагрузку, если бы сдвиг фаз был равен нулю (активная нагрузка). Это причина потерь активной энергии источника и постановки задачи данной работы – разработать средства для восполнения потерь энергии при передаче и трансформации ее по длинной линии к удаленному мобильному потребителю.

В работах Н. Тесла [8] и российских учёных [12-14] был предложен метод преобразования и передачи полной мощности с помощью реактивного емкостного тока с использованием резонансных свойств однопроводной линии, изготовленной из проводника. Этот метод положен в основу настоящей работы при исследовании возможности использования проводящих сред для снижения потерь при передаче электрической энергии от генератора переменного напряжения к мобильному и удалённому на сотни метров потребителю активной энергии.

Рассмотрим типовую для такого применения электрическую цепь, характерные размеры которой длина l значительно меньше λ – длины электромагнитной волны ($l \ll \lambda$). Сравнение поведения некоторых сосредоточенных элементов схем для инерциальных и безинерциальных токов в линии выполнено в [9]. Оказалось, в цепи разомкнутой или замкнутой, могут существовать токи, образованные как инерциальными, так и безинерциальными зарядами. Как правило, в замкнутых — это кирхгофовские цепи, существующие токи из электронной проводимости значительно превышают токи из безинерциальных зарядов. Именно по этой причине последние трудно было заметить при экспериментальных исследованиях цепей. Но, как было установлено в [5], соотношение между токами радикально меняется в двух случаях:

- при увеличении частоты колебаний доля тока, создаваемого электронами проводимости, уменьшается. Это обусловлено как инерциальностью электронной проводимости, так и скин-эффектом, сужающим слой, в котором эти электроны движутся в проводнике;
- в разомкнутых (некирхгофовских) цепях доля электронной проводимости в суммарном токе падает.

Дело в том, что поля некирхгофовских токов всегда имеют поперечный характер. И при отсутствии взаимодействия с электронами проводимости они не имеют потерь в проводниках. Вероятно, они отвечают за явление сверхпроводимости металлов при очень низких температурах.

А в разомкнутой электрической цепи – при отсутствии паразитной ёмкости между концами цепи, которая могла бы замкнуть кирхгофовскую цепь, электроны проводимости практически не создают тока. Безинерциальные же токи могут образовать стоячую волну с узлами тока на концах цепи. По этой причине в разомкнутой цепи существует ток, пропорциональный $\sin(\pi z / \lambda)$, где z – расстояние от генератора колебаний до точки обрыва цепи. Таким образом, обеспечивается передача энергии составного тока по одному проводу.

Для демонстрации и комментария этого процесса создают цепь из генератора, двух соединительных проводов и двух металлических тел (Тело 1, Тело 2: уединённые ёмкости – модели потребителей энергии), изображённую на рис. 1а. В «ветвях» этой разомкнутой цепи при работе генератора будет течь ток.

Течение тока по цепи можно представить эквивалентной схемой замещения, изображённой на рис. 1б. На этой схеме $C_{1\infty}$ и $C_{2\infty}$ – уединённые ёмкости первого и второго тел, C_{12} – взаимная ёмкость между этими телами (конденсатор). Конечно, можно считать бесконечно удалённую поверхность S проводником и разомкнутую цепь привести к замкнутой кирхгофовской цепи. Ибо замкнутой кирхгофовской цепью служит последовательное соединение элементов: тело 1 – проводник – генератор U – проводник – тело 2 – ёмкость C_{12} – тело 1. Но, если ёмкость C_{12} мала, то ёмкостью можно пренебречь, и оставшаяся часть схемы представит некирхгофовскую цепь, подчиняющуюся собственным волновым законам. В такой цепи ток в различных сечениях проводов между каждым телом и генератором может быть различен. В цепи может установиться стоячая волна тока и напряжения.

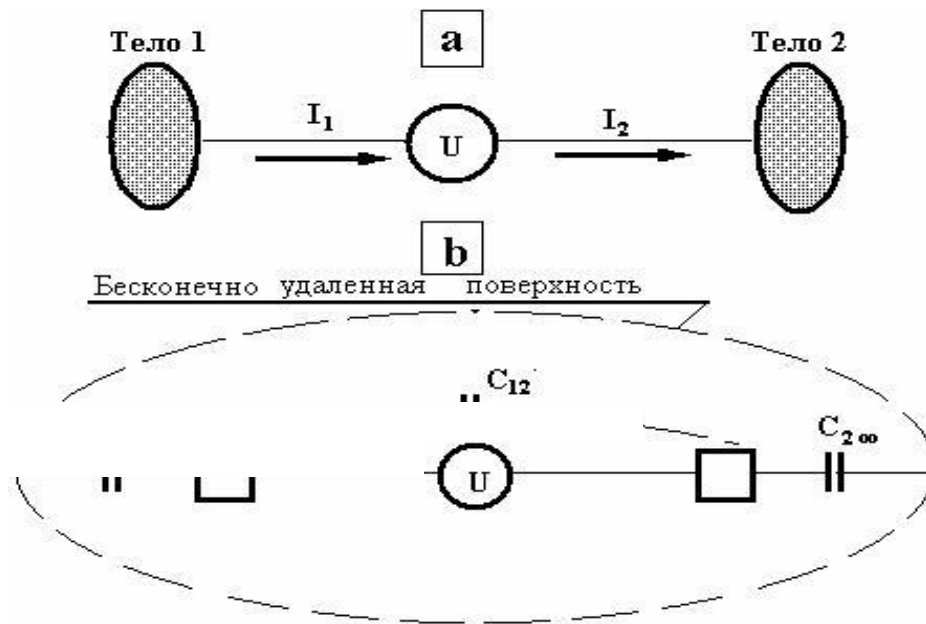


Рисунок 1 – Передача энергии в разомкнутой (некирхгофской) цепи при наличии переменного напряжения U [3]

При экспериментальных исследованиях в [5] оказалось, что подобная цепь обладает любопытными свойствами. Так, 5.08.90 в одной из лабораторий МЭИ был продемонстрирован и зарегистрирован эксперимент, схема которого изображена на рис. 2. В экспериментальную установку входил 1 – генератор переменного напряжения мощностью до 100 кВт, генерирующий напряжение с частотой 8000 Гц. Этот генератор питал первичную обмотку трансформатора Тесла – 2.

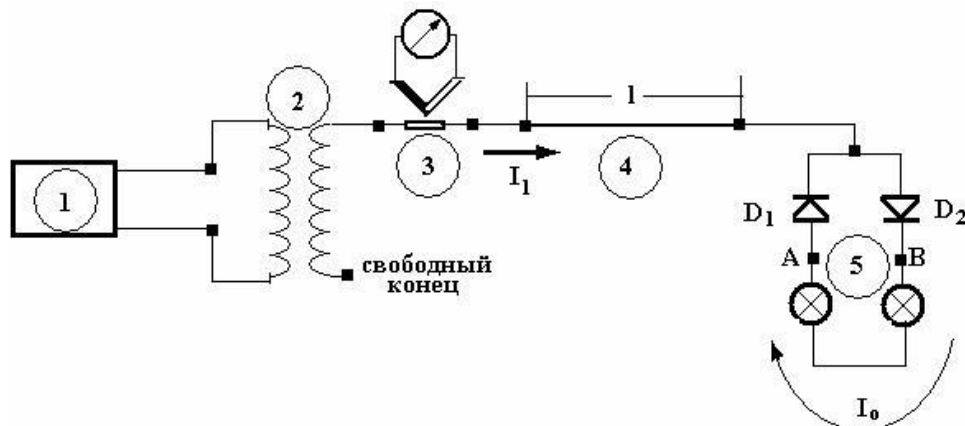


Рисунок 2 – Экспериментальная установка для однопроводной передачи электрической мощности по Вилке Авраменко [5]

Один конец вторичной обмотки трансформатора Тесла был свободен и ни к чему не подключен. Ко второму концу вторичной обмотки были подсоединены последовательно следующие элементы:

- термоэлектрический миллиамперметр - 3,
- тонкий вольфрамовый провод – 4, его длина 2,75 м, а диаметр 15 мкм;
- “Вилка Авраменко” - 5.

По этой разомкнутой цепи передавали от генератора к нагрузке (лампам накаливания) электрическую мощность порядка 1,3кВт. Электрические лампочки

ярко горели, что легко объяснимо – т.к. схема содержит уединённую ёмкость, образованную цепочкой ламп накаливания и соединяющими их проводами. При положительном полупериоде напряжения через диод D_1 в эту цепь течёт зарядный ток и потенциал уединенной емкости возрастает. А при отрицательном полу периоде напряжения эта емкость разряжается через диод D_2 , приобретая новую величину потенциала. Зарядно-разрядный ток I_0 всегда имеет одно направление и его величины достаточно, чтобы поддержать на лампах накаливания в Вилке Авраменко достаточную мощность в 1,3кВт.

Однако такое объяснение противоречит следующему установленному в эксперименте факту. Термоэлектрический миллиамперметр 3 зафиксировал очень малую величину тока I_1 при передаче целых 1,3кВт (достаточных для вскипания воды в электрочайнике), а тонкий *вольфрамовый* провод 4 даже *не нагрелся(!)*. Это послужило главной причиной трудности объяснения результатов эксперимента Авраменко.

В работе [12] приведены результаты других измерений уже при более высоких частотах и более низких напряжениях. В итоге установлено:

1. Ток в нагрузке I_0 через вилку Авраменко линейно увеличивается с ростом частоты генератора в диапазоне измерений 5 – 100 кГц.
2. Ток в нагрузке I_0 практически линейно возрастает с ростом напряжения генератора при постоянной частоте, что свидетельствует о ёмкостном характере электрической цепи.
3. Ток I_1 был очень мал по сравнению с током I_0 ($I_1 \ll I_0$) и практически не обнаруживался ни тепловым, ни магнитоэлектрическим измерителем тока.
4. Измеренное значение отношения токов I_0 / I_1 составляло величину от 4 до 10 (и даже 12). В частности, оно зависело от длины проводника, подсоединяемого к А - к свободному выводу вторичной обмотки трансформатора 2.

Таким образом, был установлен факт важный для решения нами поставленной задачи. Суть его в том, что ток I_1 оказался во много раз меньше тока I_0 . То есть, потребляемый нагрузкой ток (потребителем) больше, чем отбираемый ДЛ – длинной линией от генератора. Кроме того, из теории ДЛ известно, что в ней может возникать стоячая волна. Следовательно, если потребителя энергии подключить к узлу тока и пучности потенциала (наибольшего напряжения), которые нужны в конце ДЛ с нагрузкой, то при подобном распределения тока удаленный потребитель получит эффект дополнительной эжекции энергии. Для этого в ДЛ должны быть выбраны соответствующие параметры и генератора (частоты и амплитуды), и линии, согласованные с RLC параметрами нагрузки потребителя.

Для оптимизации параметров ДЛ и Вилки Авраменко можно применить технологию имитационного моделирования процесса передачи высокочастотной энергии по некирхгофсовской цепи к удалённому потребителю или математический анализ.

Построим для системного анализа модель исследуемого объекта. Примем в качестве источника переменной энергии высокочастотный генератор типа трансформатора Тесла – ТТ, питающий через длинную линию удаленную нагрузку. На низковольтную обмотку трансформатора работает генератор периодического напряжения, питающийся от аккумулятора. В настоящей работе будем опираться на известный тип действующих модернизированных моделей устройств, генерирующих и принимающих реактивную электроэнергию с помощью антенны. Для этого устройство ДЛ представляет собой незамкнутую (однопроводную) электрическую цепь. На одном конце её включены антенна-приемник (в терминах электротехники – уединённый конденсатор). На уединённый конденсатор с помощью повышающего трансформатора ТТ подаётся переменное высокое напряжение и частотой в несколько десятков кГц, которое поступает приемнику этой энергии.

Выберем провод (это электрическая некирхгофсовская цепь), длина которого сравнима с длиной волны самой высокочастотной спектральной составляющей передающегося сигнала в нагрузку. Провод образует длинную линию с одинаковыми свойствами – ДЛ. Влияние длины этого провода будет очевидным. Влиять будет всё: длина, сечение, диэлектрическая проницаемость и прочие параметры. То есть получаем для системного анализа линию с распределенными параметрами.

Ее анализ и оптимизация требуют представления линии электропередач в виде цепи с распределенными параметрами или длинной линии, у которой сколь угодно малый элемент линии будет обладать четырьмя свойствами: активным сопротивлением и индуктивностью, а между проводами – проводимостью и емкостью [11]. Длинная линия, обладающая одинаковыми свойствами во всех элементах, получила название однородной. Это условия является неоднородной идеализацией, так как в реальных условиях есть токи утечки, распределенная индуктивность и емкость линии. Пример схемы замещения однородной длинной линии приведен на рис. 3.

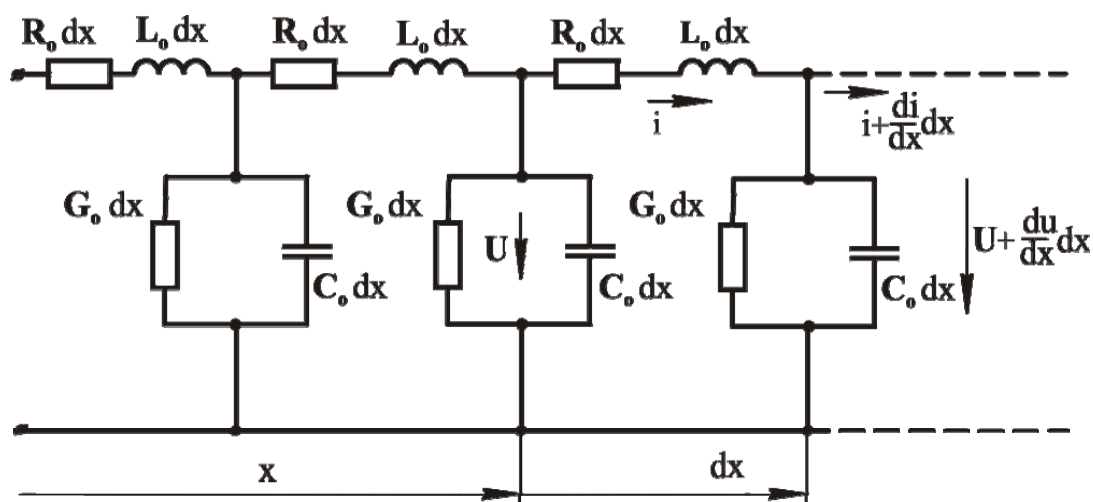


Рисунок 3 – Общая схема замещения длинной линии [14]

На схеме указаны:

R_0 – удельное продольное активное сопротивление линии, т.е. сопротивление проводов на единицу длины, Ом/м;

L_0 – удельная продольная индуктивность линии, Гн/м;

G_0 – удельная поперечная активная проводимость линии, т.е. проводимость для учета утечки через изоляцию линии на единицу длины, См/м;

C_0 – удельная поперечная емкость линии, Ф/м.

Все перечисленные величины составляют первичные параметры длинной линии. Для процессов в однородной линии справедливы волновые уравнения вида:

$$\begin{cases} -\frac{du}{dx} = R_0 * i + L_0 \frac{di}{dt} & (1) \\ -\frac{di}{dx} = G_0 * U + C_0 \frac{du}{dt} & (2) \end{cases}$$

Эти уравнения имеют множество решений в зависимости от режима работы линии: установившийся или переходный процессы. При анализе установившихся режимов работы длинных линий за основу принимают линии электропередач

переменного тока с синусоидальным характером его изменения. Это позволяет использовать символический метод расчета и можно исключить одну из переменных (время), т.е. использовать в качестве основного параметра – координату конкретной точки линии. При таком подходе уравнения (1) и (2) примут следующий вид:

$$\begin{cases} -\frac{d\dot{U}}{dx} = (R_0 + j\omega L_0) * \dot{I} = \underline{Z}_0 * \dot{I} \\ -\frac{d\dot{I}}{dx} = (G_0 + j\omega C_0) * \dot{U} = Y_0 * \dot{U} \end{cases}, \quad (3)$$

где $\underline{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0$ – удельное комплексное продольное сопротивление линии;

$Y_0 = G_0 + j\omega C_0$ – удельная комплексная поперечная проводимость линии.

Решение уравнений относительно напряжения и тока имеет вид:

$$\dot{U}(x) = \dot{A}_1 * e^{-jx} + \dot{A}_2 * e^{-jx} \quad (5)$$

$$\dot{I}(x) = \frac{\dot{A}_1 * e^{-jx}}{Z_0} + \frac{\dot{A}_2 * e^{-jx}}{Z_0}, \quad (6)$$

где \dot{A}_1 и \dot{A}_2 – комплексные постоянные интегрирования, имеющие размерность напряжения;

$\gamma = \sqrt{\underline{Z}_0 Y_0} = \alpha + j\beta$ – комплексный коэффициент распространения волн, включающий коэффициент их затухания (α) и коэффициент фазы (β);

$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}}$ – комплекс волнового сопротивления длинной линии, определяющий отношение напряжения к току в любой точке линии.

Параметры γ и \underline{Z}_c являются вторичными параметрами длинной линии.

Кроме перечисленных параметров, при анализе режимов работы длинной линии учитывают фазную скорость движения волны:

$$V = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\lambda}{T} = \lambda * f, \quad (7)$$

где ω – циклическая частота переменного тока;

λ – длина волны или расстояние между двумя точками линии, на котором укладывается полная волна;

$T = 1/f$ – период синусоидальной функции.

Принято считать волну, движущуюся от начала линии – прямой, а движущуюся от конца линии – обратной. Уравнения (5) и (6) могут быть решены при задаваемых значениях напряжения и тока в начале линии, т.е. при $x = 0$, либо также при известных параметрах U_2 и I_2 в конце линии при $x = l$

Способы решения этих уравнений зависят от граничных условий. Если заданы U_1 и I_1 в начале линии, то уравнения (5) и (6) примут вид:

$$\dot{U}(x) = \frac{1}{2} (\dot{U}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_c) * e^{-\gamma x} + \frac{1}{2} (\dot{U}_1 - \dot{I}_1 \underline{Z}_c) * e^{+\gamma x} \quad (8)$$

$$i(x) = \frac{1}{2} \left(\frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_c} + \dot{I}_1 \right) * e^{-\gamma x} - \frac{1}{2} \left(\frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_c} + \dot{I}_1 \right) * e^{+\gamma x} \quad (9)$$

Эти же уравнения в гиперболических функциях примут такой вид:

$$\begin{cases} \dot{U}(x) = \dot{U}_1 * \operatorname{ch}\gamma x - \dot{I}_1 * \underline{Z}_c * \operatorname{sh}\gamma x \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} i(x) = \dot{I}_1 * \operatorname{ch}\gamma x - \frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_c} * \operatorname{sh}\gamma x \end{cases} \quad (11)$$

Если в качестве исходных граничных условий задать напряжение и ток в конце линии U_2 и I_2 , то следует ввести новую координату $y = l - x$, (т.е. ввести отсчет от конца линии). В итоге для таких граничных условий в гиперболических функциях можно получить такую систему уравнений.

$$\begin{cases} \dot{U}(y) = \dot{U}_2 * \operatorname{ch}\gamma y + \dot{I}_2 * \underline{Z}_c * \operatorname{sh}\gamma y \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} i(y) = \dot{I}_2 * \operatorname{ch}\gamma y - \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_c} * \operatorname{sh}\gamma y \end{cases} \quad (13)$$

Теперь входное сопротивление длинной линии можно определить по формуле:

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{\dot{U}_1(y=l)}{\dot{I}_1(y=l)} = \frac{\dot{U}_2 * \operatorname{ch}\gamma y + \dot{I}_2 * \underline{Z}_c * \operatorname{sh}\gamma y}{\dot{I}_2 * \operatorname{ch}\gamma y - \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_c} * \operatorname{sh}\gamma y} \quad (14)$$

Исследования показали, что при сравнении результатов расчета в ДЛ получено существенное различие входных сопротивлений линии в зависимости от режима работы. В частности, в режиме короткого замыкания при наращивании длины ДЛ к мобильному потребителю может измениться даже характер этого сопротивления – с индуктивного на емкостной.

Для условий применения длинной линии в качестве составной части Вилки Авраменко, передающей энергию на удаленную нагрузку, имеющую емкостной характер, необходимо рассмотреть типовые режимы ее работы с первичной емкостной обмоткой приемного трансформатора нагрузки. Это непрерывно чередующиеся режимы: короткое замыкание (работа ДЛ на разряженную емкостную обмотку трансформатора) и холостой ход (работа ДЛ на полностью заряженную емкостную первичную обмотку трансформатора нагрузки). Поскольку в такой ДЛ процессы сопровождаются высокими рабочими частотами и при высоких уровнях питающего синусоидального напряжения (свыше 1000 В), и когда наблюдаются соотношения $R_0 \ll \omega L_0$, а $G_0 \ll \omega C_0$, то можно пренебречь параметрами R_0 и G_0 (принять их равными нулю и линия получит название «линия без потерь»). Также можно указать, что данная линия без потерь одновременно является и частным случаем линии без искажения, поскольку для нее характерны следующие свойства:

$$\alpha = 0; \beta = \omega \sqrt{L_0 * C_0}; \underline{Z}_c = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \underline{Z}_c * e^{j_0}; V = \frac{1}{\sqrt{L_0 * C_0}} \quad (15)$$

Поэтому можно упростить работу с (12 – 14), если воспользоваться известными формулами для расчета параметров L_0 и C_0 для единичных отрезков двухпроводной линии:

$$L_0 = \frac{\mu_0 \mu}{\pi} * \ln\left(\frac{d}{r_0}\right), \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \quad (16)$$

$$C_0 = \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon}{\ln\left(\frac{d}{r_0}\right)}, \frac{\text{Ф}}{\text{м}}, \quad (17)$$

где d – расстояние между проводниками, а r_0 – радиус провода, то расчетная формула для определения фазовой скорости линии без потерь примет вид

$$V = \frac{1}{\sqrt{L_0 * C_0}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu * \varepsilon_0 \varepsilon}}. \quad (18)$$

А учитывая, что скорость света в вакууме $C = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$, то в линиях без потерь фазовая скорость составит

$$V = \frac{C}{\sqrt{\mu * \varepsilon}}, \quad (19)$$

где μ и ε – относительные значения магнитной и диэлектрической проницаемости среды соответственно.

Теперь для линии без потерь формулы (12 – 14) проще, так как коэффициент затухания равен нулю, поэтому они примут вид:

$$\begin{cases} \dot{U}(y) = \dot{U}_2 * \cos \beta y + j \dot{I}_2 * Z_c * \sin \beta y \\ \dot{I}(y) = \dot{I}_2 * \cos \beta y + j \frac{\dot{U}_2}{Z_c} * \sin \beta y \end{cases} \quad (20)$$

$$\quad (21)$$

Сфокусируем внимание, что главный интерес в данном исследовании имеем к линии без потерь, в которой должны быть стоячие волны. Эта возможность в ДЛ проявляется в режимах холостого хода, короткого замыкания, а также при чисто реактивной нагрузке. Физически образование стоячей волны объясняется наложением прямых и обратных волн с одинаковыми амплитудами. В результате в ДЛ они образуют узлы и точки пучности.

Именно этот аспект имеет наибольшую значимость для решения поставленной в статье задачи – так как определяет условия создания стоячей волны в ДЛ с пучностью напряжения в точке подключения емкостной нагрузки в виде принимающего энергию из ДЛ трансформатора с емкостной первичной обмоткой. Анализ линии без потерь на предмет наличия стоячих волн выполним на примере длинной и короткой линий.

Сначала рассмотрим короткую линию без потерь длиной $l = 35$ м, которая имеет волновое сопротивление 500 Ом и питает удаленного потребителя. Длина волны в ней $\lambda = 50$ м. Определим ее вторичные параметры в режиме короткого замыкания, и в том случае, когда длина короткой линии уменьшится вдвое. Для режима короткого замыкания ДЛ расчетные формулы (20) и (21) примут вид:

$$\dot{U}(y) = j \dot{I}_2 * Z_c * \sin \beta y, \quad (22)$$

$$\dot{I}(y) = \dot{I}_2 * \cos \beta y. \quad (23)$$

И в начале линии, где $y = l$, получим

$$\underline{Z}_{\text{вх}}(y = l) = jZ_c * \operatorname{tg} \beta y = jZ_c * \operatorname{tg} \frac{2\pi l}{\lambda} \quad (24)$$

или в цифрах:

$$\underline{Z}_{\text{вх}}(y = 35 \text{ м}) = j500 * \operatorname{tg} 2\pi * \frac{35}{50} = j1527 \text{ Ом.}$$

Оказалось, что характер этого сопротивления чисто индуктивный, т.е. в конце линии имеем максимум тока, а не напряжения.

Проверяем, что произойдет при укорочении длины этой линии? При $l = 25\text{м}$ получим

$$\underline{Z}_{\text{вх}}(y = 25\text{м}) = -j*0,804.$$

А здесь сопротивление ДЛ имеет уже чисто емкостной характер. И оно будет равно нулю в конце таких линий, где $\operatorname{tg} \frac{2\pi l}{\lambda} = 0$. Отсюда пучности напряжения в конце линии можно сформировать при ее длинах:

$$\frac{2\pi l}{\lambda} = \pi n \text{ или } l = n \frac{\lambda}{2} \quad (25)$$

Задаваясь значениям $n=0, 1, 2, 3, \dots$, получим, что подходящими окажутся

$$l = 25\text{м}, 50\text{м}, 75\text{м} \dots \text{м.}$$

Таким образом, длины ДЛ кратные 25м, когда в конце Вилки Авраменко сопротивление будет равно бесконечности, обеспечат пучность напряжения, что и обеспечит максимально быструю зарядку емкости трансформатора нагрузки-потребителя и повысит КПД ДЛ.

Рассмотрим другой пример, который демонстрирует характер стоячих волн в линии без потерь, но уже с учетом влияния на нее нагрузки - дополнительной индуктивности $L = 5 \text{ мкГн}$, которой обладает (первичная) входная емкостная обмотка трансформатора потребителя энергии, передаваемой потребителю через Вилку Авраменко. Пусть теперь ДЛ имеет собственные параметры такие: $L_0 = 2 \text{ мкГн/м}$, $C_0 = 0,8*10^{-9} \text{ Ф/м}$, а рабочая частота колебаний на ее входе большая - $f = 10 \text{ МГц}$.

Рассчитаем волновое сопротивление такой ДЛ -

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = j\beta = j\omega\sqrt{L_0 C_0} = j2,51 \frac{\text{рад}}{\text{км}}, \quad \text{откуда } \beta = 2,51.$$

Так как рассматриваем установившийся режим работы, а линия, как и в предыдущем примере, без потерь, то уравнения (20) и (21) можно представить в упрощенном виде, если учесть, что

$$\dot{i}_2 = \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_2} = \frac{\dot{U}_2}{jX_L} \quad (26)$$

Тогда:

$$\dot{U}(y) = \dot{U}_2 \left(\cos \beta y + \frac{\underline{Z}_c}{X_L} * \sin \beta y \right), \quad (27)$$

$$\dot{i}(y) = \dot{i}_2 \left(\cos \beta y - \frac{X_L}{\underline{Z}_c} * \sin \beta y \right). \quad (28)$$

Обозначим $\frac{z_c}{x_l} = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi}$. После подстановки уравнения примут вид:

$$\dot{U}(y) = \frac{\dot{U}_2}{\cos \varphi} (\cos \beta y * \cos \varphi + \sin \varphi * \sin \beta y) = \frac{\dot{U}_2}{\cos \varphi} * \cos(\beta y - \varphi) \quad (29)$$

$$\dot{i}(y) = \frac{\dot{i}_2}{\sin \varphi} (\cos \beta y * \sin \varphi - \cos \varphi * \sin \beta y) = \frac{\dot{i}_2}{\sin \varphi} * \sin(\beta y - \varphi) \quad (30)$$

Видим, что комплексы напряжения и тока распределены по гармоничному синусоидальному закону вдоль линии, что свидетельствует о возможности существования стоячих волн напряжения и тока в ДЛ.

После подстановки числовых значений, получим:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{z_c}{x_l} = \frac{z_c}{2\pi f L} = \frac{50}{6,28 * 10^7 * 5 * 10^{-6}} = 0,159 \text{ или } \varphi \approx 9^\circ,$$

$$\text{а } \sin \varphi = 0,157 \text{ и } \cos \varphi = 0,987.$$

При этих данных:

$$\dot{U}(y) = 1,013 * \dot{U}_2 * \cos(2,51y - 9^\circ);$$

$$\dot{i}(y) = 6,357 * \dot{i}_2 * \cos(2,51y - 9^\circ).$$

Видим, что узлы напряжения возникают в точках линии, где

$$\cos(2,51y - 9^\circ) = 0.$$

Значит первый узел **напряжения** находим по условию:

$$2,51y - 9^\circ = \frac{\pi}{2} (90^\circ).$$

Откуда

$$y_1 = \frac{99}{2,51} = \frac{1,729 \text{ рад}}{2,51 \frac{\text{рад}}{\text{м}}} = 0,69 \text{ м.}$$

Аналогично первый узел **тока** соответствует условию: $\sin(2,51y - 9^\circ) = 0$ или $2,51y_2 = 0,158 \text{ рад} \Rightarrow y_2 = \frac{0,158}{2,51} = 0,063 \text{ м.}$

Тогда расчетная длина волны – λ составит: $\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{6,28}{2,51} = 2,5 \text{ м}$, а расстояние между следующими узловыми точками напряжения и тока, равно $\frac{\lambda}{2} = 1,25 \text{ м}$.

Как видим, подъем рабочей частоты ДЛ до 10 МГц в 20 раз уменьшил расстояние между узлами пучности напряжения в ДЛ, что позволяет частотой осуществлять плавное изменение расстояния до потребителя: малыми шагами наращивания/сокращения длину ДЛ (можно по 1,25 м, вместо шага в 25 метров), обеспечивающего постоянное наличие стоячей волны напряжения в конце ДЛ.

Теперь, для того чтобы учесть влияние фактических параметров нагрузки при работе ДЛ на конкретного потребителя, инструментами имитационного моделирования следует уточнить характер волновых процессов. Анализ переходных процессов необходимо проводить с использованием телеграфных уравнений, рассмотренных выше. В подавляющем большинстве случаев при анализе переходных процессов можно пренебрегать потерями в линии ($R_0 = 0$; $G_0 = 0$), что позволит существенно упростить расчеты. В этих условиях поиск решений телеграфных уравнений в

любой координате x по длине однородной линии (где $L_0 = \text{const}$ и $C_0 = \text{const}$) можно выполнить по формулам:

$$u(x, t) = f_1(x - Vt) + f_2(x + Vt) = u_{\text{пр}}(x, t) + u_{\text{обр}}(x, t); \quad (31)$$

$$i(x, t) = \frac{u_{\text{пр}}(x, t)}{Z_c} - \frac{u_{\text{обр}}(x, t)}{Z_c} = i_{\text{пр}}(x, t) + i_{\text{обр}}(x, t), \quad (32)$$

где $Z_c = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$ – волновое сопротивление линии без потерь; $V = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$ – фазовая скорость волны или волновая скорость; $u_{\text{пр}}(x, t)$ – прямая волна напряжения; $u_{\text{обр}}(x, t)$ – обратная волна напряжения.

Если учесть, что в линиях без потерь нет затухания волн при движении, то на любом участке линии для расчета составляющих прямой и обратной волн достаточно учесть только время прохождения волны до расчетной координаты на длинной линии. Это время задает скорость движения волн в воздушной линии с медными или алюминиевыми проводами ($\mu = 1$, $\varepsilon = 1$), которая примерно равна скорости света и определяется по формуле:

$$V = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \frac{1}{\mu_0 \mu * \varepsilon_0 \varepsilon} \approx 3 * 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

где $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная; $\varepsilon_0 = 8,85 * 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$ – электрическая постоянная.

Таким образом, применяя численный метод характеристик, можно осуществить моделирование работы ДЛ с любой нагрузкой, задающей любые сложные нелинейные граничные условия в процессе вычислений параметров колебаний для внутренних узлов расчетной сетки области существования числового решения.

Выводы

Проведенный анализ позволил обобщить доказанную теоретически и экспериментально возможность передачи энергии по длинной линии от одного генератора питания параллельно нескольким потребителям, суммарное потребление которых даже может превышать мощность первичного источника.

Представленные расчеты показали, что высокочастотным колебаниям в длинной линии практически любой длины характерно наличие стоячих волн, приводящих к появлению узлов тока и пучности потенциала. Причем, подключение к длинной линии дополнительной емкости или индуктивности изменяет положение таких узлов вдоль ее. Поэтому, если потребителя энергии подключить к узлу тока или пучности потенциала (наибольшего напряжения), которые нужны в конце ДЛ перед нагрузкой, то при подобном распределении тока удаленный потребитель получит эффект дополнительной эжекции энергии, отпускаемой ему первичным источником. А для этого в ДЛ должны быть выбраны соответствующие параметры и генератора (частоты и амплитуды), и линии, согласованные с RLC параметрами нагрузки потребителя.

В сравнительных расчетах координат узлов тока обнаружена возможность уменьшения до метра расстояние между ними за счет перестройки на высокие частоты питающего генератора, что открывает простой механизм компенсации частотой влияния изменений длины провода длинной линии, питающей перемещающегося в пространстве робота-потребителя электрической энергии.

Список литературы

1. Касьянов Г. Т. Генерация энергии в однопроводной электросхеме [Текст] / Г. Т. Касьянов // Современные наукоёмкие технологии. – 2011. – № 2. – С. 36–39.
2. Гуревич А. Г. Магнитные колебания и волны [Текст] / Гуревич А. Г., Мелков Г. А. – ФИЗМАТЛИЗ, 1994. – 464с.
3. Передача электроэнергии на большие расстояния: Учебное пособие / С. С. Ананичева, П. И. Бартоломей, А. Л. Мызин. – 3-е изд., исправл. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 85 с.
4. Кулигин В. А. Калибровки и поля в электродинамике [Текст] / В. А. Кулигин, Г. А. Кулигина, М. В. Корнева / Воронеж. ун-т. – Воронеж, 1998. Деп. в ВИНТИ 17.02.98, №476-B98.
5. Ермоленко Д. В. Результаты испытаний резонансной однопроводной системы передачи электроэнергии на объекты инфраструктуры ОАО «РЖД» [Текст] / Д. В. Ермоленко, Л. Ю. Юферев, О. А. Рощин // Вестник ВНИИЖТ. – 2018. – Т. 77, № 5. – С. 295–300.
6. Способ и устройство передачи электрической энергии: патент РФ № 2423772: МПК H02J 17/00 (2006.01) [Текст] / Л. Ю. Юферев, Д. С. Стребков. Оpubл. 10.07.2011. Бюл. № 19.
7. Касьянов Г.Т. Тесловский однопроводный ток, его физические свойства и способы использования [Текст] / Г. Т. Касьянов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2010 – № 5. – С. 35-40.
8. Tesla N. U.S. patent 0,454622 - Sistem of Electric Lighting-1891 June 23. [Текст] / Tesla N.
9. Шипов Г. И. Физический вакуум, торсионные поля, квантовая механика и эксперименты Н. Теслы [Электронный ресурс] / Шипов Г. И. // Академия Тринитаризма. – М., Эл №77-6567, публ. 15740, 07.01.2010. – Режим доступа: <http://www.trinitas.ru/rus/doc/0231/008a/02311081.htm>.
10. Horst Eckardt. Devices for space-time resonance based on ECE theory [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aias.us/documents/miscellaneous/spacetimedevelop.pdf>
11. Стребков Д. С. Способ питания электротранспортных средств и устройство для его осуществления. Пат. РФ № 2136515 от 26.08.1998. Оpubл. 10.09.1999. Бюл. № 25 [Текст] / Д. С. Стребков, С. В. Авраменко, А. И. Некрасов.
12. Стребков Д. С. Исследование однопроводной системы передачи электрической энергии [Текст] / Д. С. Стребков, С. В. Авраменко, А. И. Некрасов // Межд. конф. Экология и с.-х. Техника. – Санкт-Петербург, 2000. – С. 50–55.
13. Косинов Н. В. Однопроводная и беспроводная передача энергии [Электронный ресурс] / Н. В. Косинов, Гарбарук В.И. // Академия Тринитаризма. – М., Эл № 77-6567, публ.12433, 16.09.2005. – Режим доступа: <http://www.trinitas.ru/rus/doc/0231/004a/02310017.htm>
14. Кадомская К. П. Об однопроводной системе передачи силовой электрической энергии [Текст] / К. П. Кадомская, С. А. Кандаков, Д. М. Лебедев // Сборник научных трудов НГТУ. – 2011. – № 2(64) – С. 123–134.
15. Павлыш В. Н. Модификация алгоритма управления фотоэлектрическим модулем с применением 3-D технологий [Текст] / В. Н. Павлыш, С. А. Зори, В. Г. Черников // Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта». – 2022. – № 3(26). – С. 29–40.

References

1. Kasyanov G.T. Generatsiya energii v odnoprovodnoy elektroskheme [Energy generation in a single-wire electrical circuit]. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii* [Modern high-tech technologies]. 2011. No. 2. pp. 36-39.
2. Gurevich A. G., Melkov G. A. *Magnitnyye kolebaniya i volny* [Magnetic oscillations and waves]. FIZMATLIZ, 1994. 464с.
3. *Peredacha elektroenergii na bol'shiye rasstoyaniya: Uchebnoye posobiye* [Transmission of electricity over long distances: A textbook] / S. S. Ananicheva, P. I. Bartolomey, A. L. Myzin; 3rd edition, corrected. Yekaterinburg: UrFU, 2012. 85 p.
4. Kuligin V.A., Kuligina G.A. Korneva, M.V. *Kalibrovki i polya v elektrodinamike* [Calibrations and fields in electrodynamics] / Voronezh. un-T. – Voronezh, 1998. Dep. in VINITI 17.02.98, No. 476-B98.
5. Ermolenko D.V., Yuferev L.Yu., Roshchin O.A. Rezul'taty ispytaniy rezonansnoy odnoprovodnoy sistemy peredachi elektro-energii na ob'yekty infrastruktury OAO «RZHD» [Test results of a resonant single-wire power transmission system to infrastructure facilities of JSC "Russian Railways"]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZhT] 2018. Vol. 77. No. 5. pp. 295-300

6. *Sposob i ustroystvo peredachi elektricheskoy energii* [Method and device of electric energy transmission]: RF Patent No. 2423772: IPC H02J 17/00 (2006.01) / L.Yu. Yuferev, D.S. Strebkov. Publ. 10.07.2011. Byul. No. 19.
7. Kasyanov G.T. Teslovskiy odnoprovodnyy tok, yego fizicheskiye svoystva i sposoby ispol'zovaniya [Teslovsky single-wire current, its physical properties and methods of use]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research]. 2010 No. 5. pp. 35-40.
8. Tesla N. U.S. *Sistem of Electric Lighting*-1891 June 23. patent 0.454622
9. Shipov G.I. Fizicheskiy vakuum, torsionnyye polya, kvantovaya mekhanika i eksperimenty N. Tesly [Physical vacuum, torsion fields, quantum mechanics and experiments of N. Tesla]. *Akademiya Trinitarizma* [Academy of Trinitarianism]. M., El No.77-6567, publ. 15740, 07.01.2010 / <http://www.trinitas.ru/rus/doc/0231/008a/02311081.htm>.
10. Horst Eckardt. *Devices for space-time resonance based on ECE theory*. <http://www.aias.us/documents/miscellaneous/spacetime-dev.pdf>
11. Strebkov D.S., Avramenko S.V., Nekrasov A.I. *Sposob pitaniya elektrotransportnykh sredstv i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [The method of powering electric vehicles and the device for its implementation]. Pat. RF No. 2136515 of 26.08.1998. Publ. 10.09.1999. Byul. No. 25.
12. Strebkov D.S., Avramenko S.V., Nekrasov A.I. Issledovaniye odnoprovodnoy sistemy peredachi elektricheskoy energii [Investigation of a single-wire electric power transmission system]. *Mezhd. konf. Ekologiya i s.-kh. Tekhnika* [Inter. conf. Ecology and agricultural Technology]. St. Petersburg, 2000, pp. 50-55.
13. Kosinov N.V., Garbaruk V.I. Odnoprovodnaya i besprovodnaya peredacha energii [Single-wire and wireless transmission of energy]. *Akademiya Trinitarizma* [Academy of Trinitarianism], M., El No. 77-6567, publ.12433, 09/16/2005. <http://www.trinitas.ru/rus/doc/0231/004a/02310017.htm>
14. Kadomskaya K.P., Kandakov S.A., Lebedev D.M. *Ob odnoprovodnoy sisteme peredachi silovoy elektricheskoy energii* [About a single-wire transmission system of power electric energy, Collection of scientific papers of NSTU]. 2011. № 2(64). 123-134.
15. Pavlysh V. N., Zori S. A., Chernikov V. G. Modifikatsiya algoritma upravleniya fotoelektricheskim modulem s primeneniym 3-D tekhnologiy [Modification of the Control Algorithm of a Photoelectric Module Using 3-D Technologies]. *Mezhdunarodnyy retsenziruyemyy nauchno-teoreticheskiy zhurnal «Problemy iskusstvennogo intellekta»* [International peer-reviewed scientific and theoretical journal "Problems of artificial intelligence"]. 2022. No. 3(26). P. 29-40.

RESUME

*V. N. Pavlysh, G. V. Dotsenko, S. A. Grigoriev, K. V. Konovalov
Parametric Optimization of a High-Frequency Channel
of Continuous Energy Transformation to a Mobile Consumer*

The modern implementation of Tesla's ideas on the transmission of energy to a moving robot at a distance provides for the adjustment of the secondary parameters of the long line and the operating frequency of the system, which is possible with the use of computers. Of course, this leads to a significant increase in the cost of the equipment of the energy transmission system, which is its disadvantage. However, it is worth using single-wire resonant systems as part of intelligent power supply systems with distributed control, which allows using the same computer equipment both to control a moving robot and to adjust the parameters of the energy transmission channel.

The article analyzes the possibilities of transferring energy over a long line from one power generator in parallel to several consumers, whose total consumption may even exceed the power of the primary source.

The presented calculations showed that high-frequency oscillations in a long line of almost any length are characterized by the presence of standing waves, leading to the appearance of current nodes and potential antinodes. And connecting to a long line of additional capacitance, inductance or changing the frequency of the generator changes their position. At the same time, if an energy consumer is connected to a current node or a

potential antinode, then with a similar current distribution, the remote consumer will receive the effect of additional ejection of energy released to him by the primary source.

In the given comparative calculations of the coordinates of the current nodes, the possibility of reducing the distance between them to a meter by adjusting the supply generator to high frequencies was found, which opens up a simple mechanism for frequency compensation of the effect of changes in the length of the wire of a long line feeding a robot moving in space-a consumer of electric energy.

The practical application of the above approach will ensure high efficiency of the use of quadrocopters, for example, for air treatment of agricultural land and gardens while protecting against pests.

РЕЗЮМЕ

В. Н. Павлыш, Г. В. Доценко, С. А. Григорьев, К. В. Коновалов

Параметрическая оптимизация высокочастотного канала непрерывной трансформации энергии мобильному потребителю

Современная реализация идей Теслы по передаче энергии движущемуся роботу на расстоянии предусматривает подстройку вторичных параметров длинной линии и рабочей частоты системы, что возможно с применением компьютеров. Конечно, это приводит к значительному увеличению стоимости оборудования передающей энергии системы, что является ее недостатком. Однако, применять однопроводные резонансные системы стоит как часть интеллектуальных систем электропитания с распределенным управлением, что позволяет использовать одно и то же компьютерное оборудование как для управления движущимся роботом, так и для подстройки параметров канала передачи энергии.

В статье проведен анализ возможностей передачи энергии по длинной линии от одного генератора питания параллельно нескольким потребителям, суммарное потребление которых даже может превышать мощность первичного источника.

Представленные расчеты показали, что высокочастотным колебаниям в длинной линии практически любой длины характерно наличие стоячих волн, приводящих к появлению узлов тока и пучности потенциала. А подключение к длинной линии дополнительной емкости, индуктивности или изменение частоты генератора меняет их положение. При этом, если потребителя энергии подключить к узлу тока или пучности потенциала, то при подобном распределении тока удаленный потребитель получит эффект дополнительной эжекции энергии, отпускаемой ему первичным источником.

В приведенных сравнительных расчетах координат узлов тока обнаружена возможность уменьшения до метра расстояния между ними за счет перестройки на высокие частоты питающего генератора, что открывает простой механизм компенсации частотой влияния изменений длины провода длинной линии, питающей перемещающегося в пространстве робота-потребителя электрической энергии.

Практическое применение изложенного подхода обеспечит высокую эффективность применения quadrocopters, например, для аэрообработки сельхоз угодий и садов при защите от вредителей.

Статья поступила в редакцию